

УДК 550.361

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИДОННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ОЗЕРАХ ОСТРОВА БОЛЬШОЙ СОЛОВЕЦКИЙ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ О НАЛИЧИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ

С. В. Черкасов^{1*}, И. М. Фархутдинов^{1,2}

¹ Государственный геологический музей им. В. И. Вернадского РАН
(ул. Моховая, 11, стр. 11, Москва, Россия, 125009), *s.cherkasov@sgm.ru

² ООО «РН-БашНИПНефть» (ул. Бехтерева, 3, стр. 1, Уфа, Республика
Башкортостан, Россия, 450103)

Рассмотрены результаты эксперимента по оценке геотермального потенциала территории на основе замеров придонных температур водоемов. Исследования проведены в 2021 г. на острове Большой Соловецкий, который характеризуется, с одной стороны, наличием геотермальной аномалии (по некоторым данным), а с другой – большим количеством озер. Для озер глубиной более 5 м результаты температурных измерений указывают на соответствие температурных профилей димиктического типу озер – с двумя периодами циркуляции, весной и осенью. В ходе эксперимента в озерах Большое Красное и Щучье выявлены аномальные значения придонных температур на глубинах более 15 м: 5,16–5,26 °С для озера Щучье и 6,16–6,56 °С для озера Большое Красное. Рассмотрены возможные причины выявленных аномалий, в том числе химические реакции в слое придонных осадков, повышенный тепловой поток в верхней части земной коры и ветровое перемешивание в озерах. Даны рекомендации по дальнейшему изучению аномалий с целью уточнения их природы.

Ключевые слова: геотермальная энергетика; геотермальные ресурсы; возобновляемые источники энергии; Соловецкие острова; температурный режим озер

Для цитирования: Черкасов С. В., Фархутдинов И. М. Эксперимент по использованию придонных температурных измерений в озерах острова Большой Соловецкий для проверки гипотезы о наличии геотермальной аномалии // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 6–15. doi: 10.17076/lim1513

Финансирование. Исследования профинансированы ООО «Нефть-Сервис».

S. V. Cherkasov^{1*}, I. M. Farkhutdinov^{1,2}. EXPERIMENTAL APPLICATION OF BOTTOM TEMPERATURE MEASUREMENTS IN LAKES OF BOLSHOY SOLOVETSKY ISLAND TO TEST THE GEOTHERMAL ANOMALY HYPOTHESIS

¹ Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences
(11/11 Mokhovaya St., 125009 Moscow, Russia), *s.cherkasov@sgm.ru

² RN-BashNIPIneft, LLC (3/1 Bekhtereva St., 450103 Ufa, Republic of Bashkortostan,
Russia)

The article reports the results of an experiment to assess the geothermal potential of the territory based on measurements of water reservoirs' bottom temperatures. The research was conducted in 2021 on Bolshoy Solovetsky Island, which, according to some data, is characterized by the presence of geothermal anomaly on the one hand, and has a large number of lakes on the other. For lakes with depths greater than 5 m, the results of temperature measurements indicate that the temperature profiles correspond to the dimictic type of lakes – with two periods of circulation in spring and autumn. During the experiment, abnormal values of bottom temperatures at depths of more than 15 m were detected in Lakes Bolshoe Krasnoe and Shchuchye: 5.16–5.26 °C for Lake Shchuchye, and 6.16–6.56 °C for Lake Bolshoe Krasnoe. The possible causes of these anomalies are discussed including: chemical reactions in the near-bottom sediment layer, increased heat flow in the upper part of the Earth's crust, and wind mixing in the lakes. Recommendations are given for further study of the anomalies in order to clarify their nature.

Keywords: geothermal energy; geothermal resources; renewable energy sources; Solovetsky Islands; temperature regime of lakes

For citation: Cherkasov S. V., Farkhutdinov I. M. Experimental application of bottom temperature measurements in lakes of Bolshoy Solovetsky Island to test the geothermal anomaly hypothesis. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 6–15. doi: 10.17076/lim1513

Funding. The study was funded by Oil-Service company.

Введение

Во всем мире большое внимание уделяется развитию возобновляемых источников энергии (ВИЭ), использование которых, в частности, позволит снизить спрос на углеводороды и сократить выбросы парниковых газов [Renewable..., 2018]. Одним из видов ВИЭ являются геотермальные ресурсы, которыми Россия обладает в значительной мере [Cherkasov et al., 2015]. Использование геотермальных ресурсов особенно актуально и экономически выгодно на удаленных территориях с неразвитой инфраструктурой, где геотермальная энергетика может обеспечить локальную генерацию тепла и электричества. Также геотермальные ресурсы представляют собой наиболее экологически чистый возобновляемый источник энергии, не зависящий от погодных условий [Черкасов и др., 2021].

В то же время использование геотермальных ресурсов на удаленных территориях обычно требует приложения существенных усилий, связанных с необходимыми геолого-геофизическими исследованиями, поскольку такие территории, как правило, труднодоступны и геологически слабо изучены, в том числе с точки зрения геотермальных характеристик земной коры. Наиболее объективным методом оценки геотермальных характеристик верхней части земной коры являются термометрические измерения в скважинах и горных выработках, однако во многих случаях на удаленных территориях последние отсутствуют, а бурение в труднодоступном

регионе для решения задач геотермии не представляется целесообразным.

Существующие альтернативные методы оценки теплового потока и температуры в верхней части земной коры, такие как дистанционное зондирование и наземные электромагнитные измерения, используются для построения мелкомасштабных карт геотермальных характеристик, но не позволяют выделять локальные тепловые аномалии. Для детальных исследований применяются метод редукции температурных волн (РТВ) и «озерный» метод. Метод РТВ позволяет определять тепловой поток с помощью учета периодических и непериодических изменений температуры земной поверхности [Гордиенко, 1982] на небольших глубинах (в скважинах глубиной 5–10 м) в зоне сезонных колебаний температуры и интенсивного водообмена. Этим методом изучены тепловые потоки и температуры в пределах зоны аэрации на значительной территории Украины. В России метод применялся лишь на ограниченных площадях в опытный порядок [Богуславский, 2020].

Применение «озерного» метода представлено единичными исследованиями. На данный момент известны результаты измерения геотермального градиента в донных отложениях озер [Рянжин, 1992], известны попытки оценки геотермального потока путем замера придонных температур в озерах. Так, измерения придонных температур воды на озере Байкал позволили выделить области аномального теплового потока от дна озера [Шахвердов, Шах-

вердова, 2018]. Обе модификации «озерного» метода являются пионерными и сколько-нибудь широкого применения не получили. В данной работе ставилась задача проверки гипотезы о наличии геотермической аномалии посредством измерения придонных температур водоемов острова Большой Соловецкий.

В населенном пункте, расположенном на острове, энергогенерация осуществляется за счет дизельной электростанции, топливо для которой завозится морем. Транспортные расходы существенно увеличивают стоимость топлива и стоимость производимой энергии [Кангаш, Марьяндышев, 2019]. Износ электросетей превышает 60 %, на отдельных участках – 80 %, в том числе износ энергооборудования трансформаторных подстанций [Гашо и др., 2020].

Рядом исследователей высказывалась гипотеза о повышенном геотермальном потоке под Соловецким архипелагом, которая основана на исследованиях биоценоза, нехарактерного для данной широты, а также на некоторых геологических и геофизических признаках [Природная..., 2007]. Так, фоновый тепловой поток на архипелаге, по подсчетам Ю. Г. Шварцмана, составил 50–55 мВт/м², что в 1,5 раза выше по сравнению с соседними районами Русской плиты [Методические..., 1983; Шварцман, 2001]

Кондиционных измерений плотности теплового потока в геотермозоне (ниже нейтрального слоя) на Соловецком архипелаге пока не получено, т. к. глубокие скважины не бурились.

В основе проведенного эксперимента лежит предположение о том, что при наличии геотермической аномалии придонные темпера-

туры в димиктических озерах острова должны иметь значения выше, чем классические 4 °С.

Материалы и методы

В состав Соловецкого архипелага входят шесть относительно крупных и свыше 110 мелких островов. Самый крупный из островов – Большой Соловецкий (225,28 км²). Его протяженность с севера на юг 24 км, с запада на восток – 16 км, длина изрезанной береговой линии 181 км.

Кристаллический фундамент Соловецких островов архей-протерозойского возраста представляет собой горст, разбитый разломами. Для островов характерен изостатический подъем суши со средней скоростью 1,1 мм/год [Гидрометеорология..., 1991]. Соловецкие острова расположены в пределах Кандалакшской рифтовой зоны Кольско-Беломорской рифтогенной области распространения карелид Балтийского щита на северо-восточной границе с Русской плитой [Москалева и др., 1993].

Полевые работы осуществлялись с 26 июня по 18 июля 2021 г. коллективом сотрудников ГГМ РАН при финансовой поддержке ООО «Нефть-Сервис». В ходе исследования изучены все типы водоемов о. Большой Соловецкий: от малых – оз. Большое Красное с площадью зеркала 2,743 км² до самых малых – оз. Иван и оз. Дарья с площадью менее 1 км². В ходе проведения работ осуществлена батиметрическая съемка. Затем в точках с наибольшей глубиной проводились зондирования температуры в толще воды от поверхности до дна («столбы») и замеры придонных температур. Замеры температур проводились с лодки (рис. 1). Измерение глубины (точность ± 50 мм) и температуры воды



Рис. 1. Проведение замеров с лодки

Fig. 1. Taking measurements from a boat

(точность $\pm 0,05$ °C) проводилось с помощью регистратора Solinst 3001 LTC Levellogger Edge M100 с платиновым резисторным датчиком температуры (RTD). При зондировании температуры регистратор спускался на кабеле прямого считывания (100 м) с периодически остановками (через 1,0 м) на фиксированной глубине, данные о температуре вносились после стабилизации. Регистрация температур на дне водоема осуществлялась с большей частотой (56 замеров придонных температур и 31 вертикальный профиль) [Никитин и др., 2021].

Результаты и обсуждение

После получения данных замеров температур исследованных озер и вынесения их на карту (рис. 2) были построены термограммы (рис. 3, 4) [Cherkasov et al., 2021]. Для глубоких димиктических озер термограммы характеризуются сходной моделью распределения температур по глубине – инсоляционным прогревом приповерхностного слоя (от 1 до 6 м) и резким спадом температур с последующим снижением градиента, вплоть до выхода на изотермический режим.

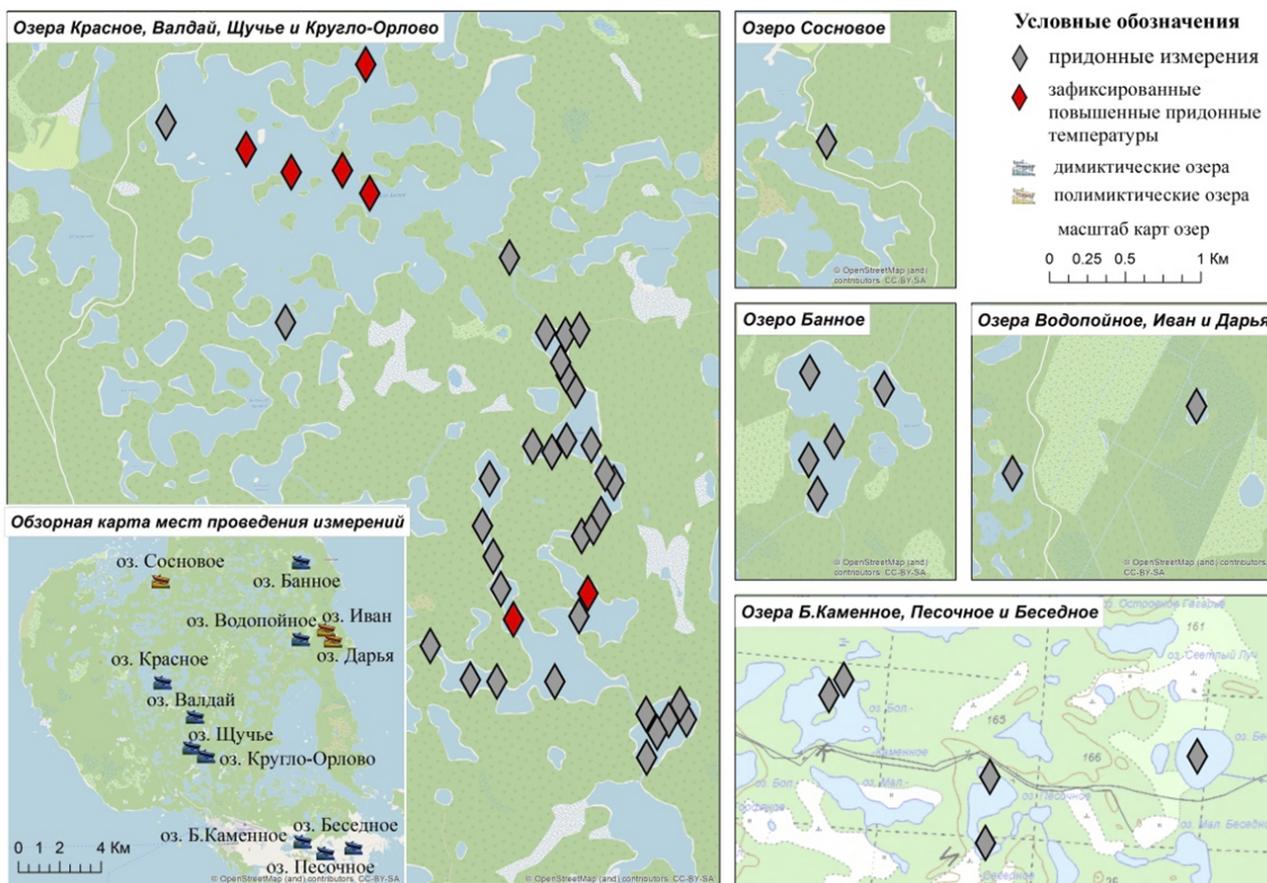


Рис. 2. Карта замеров придонных температур о. Большой Соловецкий

Fig. 2. Map of the measurements of bottom temperatures of Bolshoy Solovetsky Island

В ходе полевых работ получена 31 термограмма для глубин от 2 до 25 м с интервалом 1 м по глубине, в общей сложности – 408 измерений температуры. Кроме этого, в 56 точках измерены только придонные температуры на глубинах от 0,8 до 30,5 м. Таким образом, всего выполнено 464 измерения температуры в 10 озерах [Cherkasov et al., 2021].

Вид типичной термограммы для глубоких озер, где глубина обеспечивает выход на изотермический придонный режим, приведен на рис. 3 (озеро Валдай).

Значения придонных измерений температуры приведены в таблице 1.

Аномалии придонной температуры выявлены в двух озерах, термограмма для озера

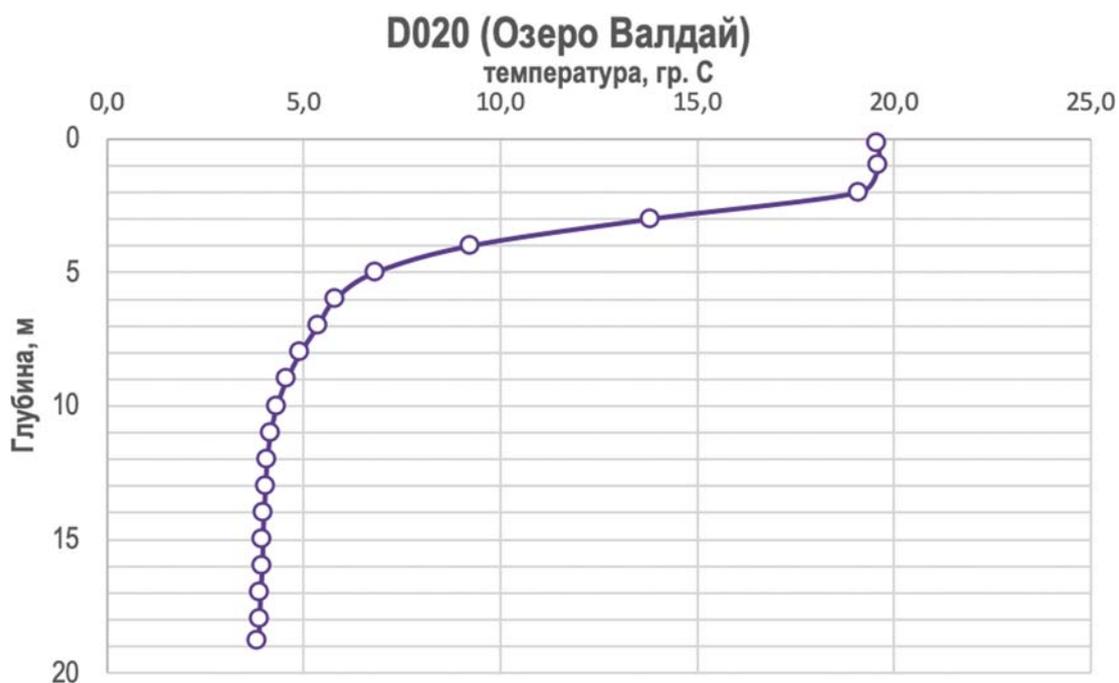


Рис. 3. Типичная термограмма для глубоких озер (на примере озера Валдай)
 Fig. 3. Typical thermogram for deep lakes (using the example of Lake Valdai)

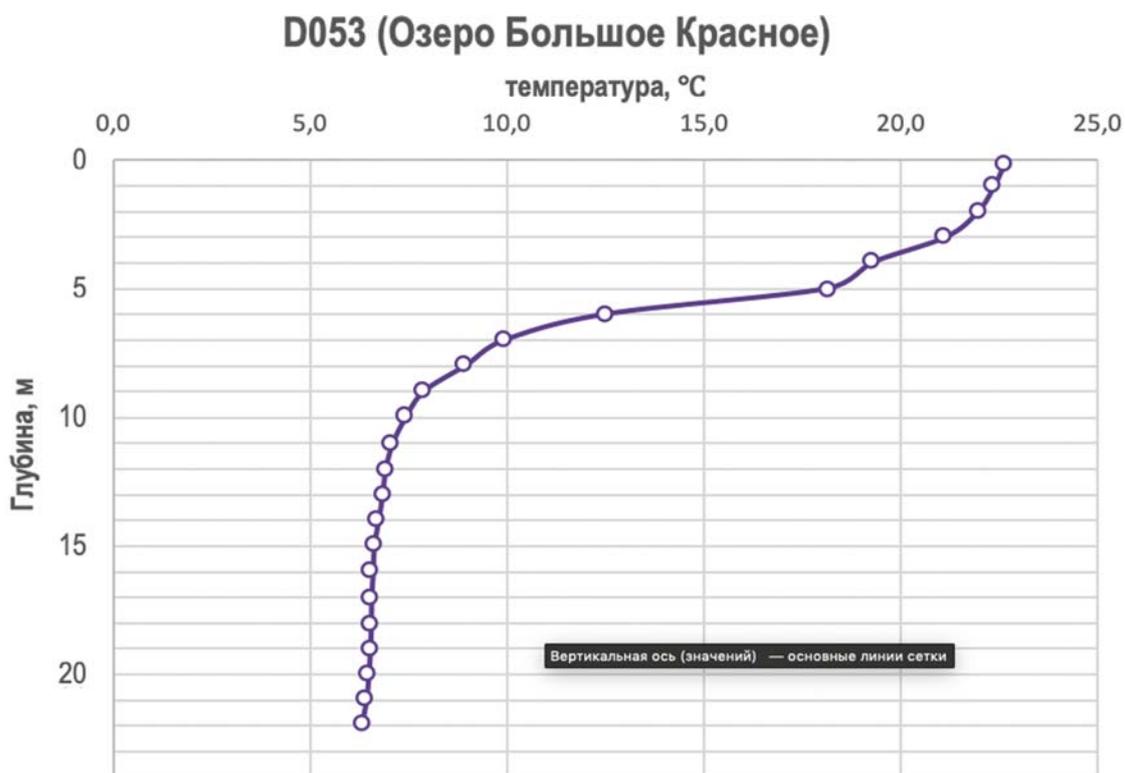


Рис. 4. Термограмма для озера с зафиксированной повышенной придонной температурой (на примере озера Большое Красное)
 Fig. 4. A thermogram for a lake with a fixed elevated bottom temperature (using the example of Lake Bolshoye Krasnoye)

Таблица 1. Придонные измерения температуры

Table 1. Bottom temperature measurements

N	Озеро / Lake	Точка наблюдений Observation point	Глубина Depth	Температура, °C Temperature, °C
1	Кругло-Орлово / Kruglo-Orlovo	D006	16	4,27
2	«	D007	11,5	4,7
3	«	D008	22,5	4,15
4	«	D009	13,7	4,39
5	«	D010	19	4,18
6	«	D011	6	6,25
7	Валдай / Valday	D012	10,1	5,35
8	«	D013	5	7,66
9	«	D014	7,5	5,61
10	«	D016	10,4	5,31
11	«	D017	5,1	6,71
12	«	D018	13,3	4,74
13	«	D019	14,3	4,09
14	«	D022	7	5,42
15	«	D023	0,8	18,35
16	«	D024	6,1	4,75
17	«	D025	15,8	3,72
18	«	D026	7,6	4,46
19	«	D027	9,5	4,15
20	«	D028	5,85	4,76
21	«	D029	15,7	4,21
22	«	D030	9,4	4,03
23	«	D031	0,9	18,71
24	Щучье / Shchuchye	D033	15,9	5,16
25	«	D034	17,05	5,12
26	«	D035	7,85	6,46
27	«	D036	3,6	13,3
28	«	D037	2,6	17,11
29	«	D038	2,7	17,1
30	«	D039	12,15	4,94
31	«	D042	13,1	4,38
32	«	D043	14,3	3,95
33	«	D044	9,4	4,02
34	«	D045	14,9	4,96
35	«	D047	11,4	5,69
36	«	D047	11,4	5,69
37	Б. Красное / B. Krasnoye	D048	4,3	9,44
38	«	D051	18,1	6,21
39	«	D052	17,8	6,15
40	«	D054	30,5	4,86
41	«	D055	16,5	6,56
42	«	D057	10	7,8
43	«	D058	19,3	6,16
44	«	D059	10,7	7,56
45	Иван / Ivan	D062	1,85	15,02
46	Водопойное / Vodopoynoye	D066	9,1	5,014
47	Банное / Bannoeye	D067	4,5	10,05
48	«	D068	5,3	9,33
49	«	D070	8,9	7,83
50	«	D072	4,5	11,43
51	«	D073	6,8	7,18
52	Б. Каменное / B. Kamennoye	D074	7,0	7,15
53	«	D076	11,4	5,61
54	Беседное / Besednoye	D079	5,9	8,88
55	Песочное / Pesochnoye	D080	5,4	8,29
56	«	D081	8,6	6,07

с зафиксированной повышенной придонной температурой приведена на примере озера Большое Красное (рис. 4), в котором на глубине 10–20 м придонные температуры были примерно на 2 °C выше, чем в других озерах (за исключением озера Щучье, по сравнению с ним – на 1 °C) (рис. 5). В озере Щучье, с одной стороны, на глубинах более 15 м температура

выше, чем в озерах Кругло-Орлово и Валдай, практически на 1 °C, с другой – в самом озере придонная температура иногда повышается с увеличением глубины озера, при этом измерения в отдельных столбах показывают уменьшение температуры с глубиной, что может свидетельствовать о наличии повышенной теплоотдачи ложа озера на отдельных участках.

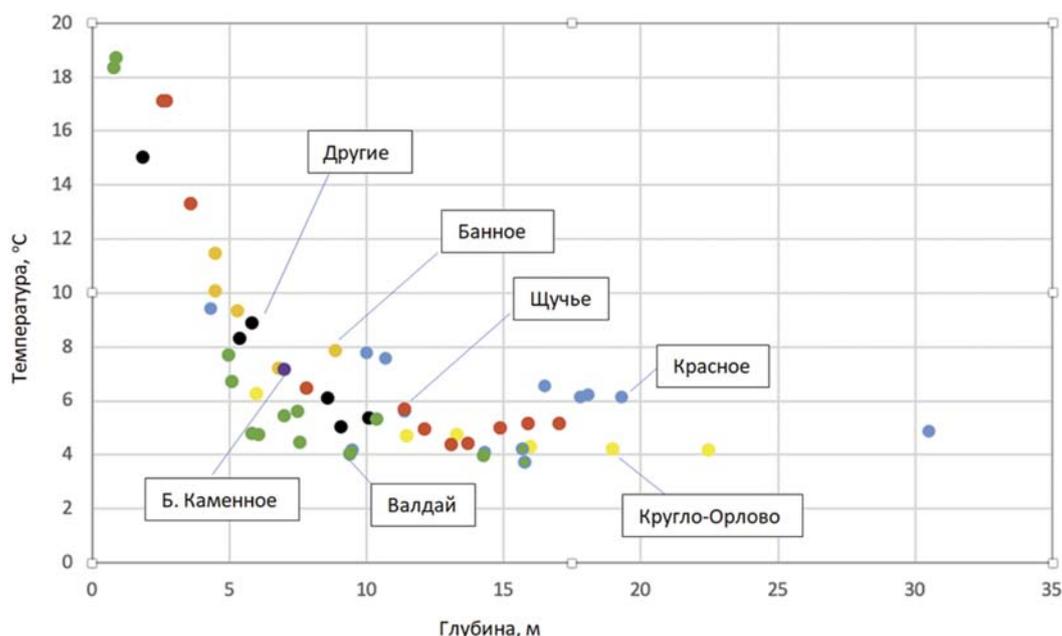


Рис. 5. Придонные температуры воды в озерах Б. Соловецкого острова. Цвет точек соответствует разным озерам, названия озер – в рамках

Fig. 5. Bottom water temperatures in the lakes of Bolshoy Solovetsky Island. The color of the dots corresponds to various lakes, the lakes names are given in boxes

В одном и том же озере на одинаковых глубинах в разных точках разброс температур может составлять до 1,2 (Валдай) и до 1,4 (Банное) °С.

Выявленные температурные аномалии в придонных слоях озер острова Большой Соловецкий могут быть обусловлены тремя факторами:

- придонными химическими реакциями в слое осадков (в сапропеле);
- различиями режимов ветрового перемешивания;
- повышенным тепловым потоком из недр.

Различие режимов ветрового перемешивания сказывается на глубине термоклина и, соответственно, на температуре нижних слоев воды в озерах. Это зависит от длины разгона и скорости ветра [Пальшин и др., 2008]. Выявленные аномалии на глубине более 15 м характерны для озер с наибольшей площадью (оз. Большое Красное – 2,7 км², оз. Щучье – 0,6 км²; табл. 2), поэтому данные аномалии могут быть вызваны различиями в режимах ветрового перемешивания озер.

Таблица 2. Площади озер о. Б. Соловецкий и выявленные температуры на разных глубинах (нет значения при отсутствии указанной глубины)

Table 2. The lake areas of Bolshoy Solovetsky Island and the detected temperatures at different depths

N	Озеро / Lake	Площадь, км ² Area, km ²	Температура на глубине 9 м, °С Temperature at a depth of 9 m, °C	Температура на глубине 15 м, °С Temperature at a depth of 15 m, °C
1	Сосновое / Sosnovoye	0,014	-	-
2	Иван / Ivan	0,021	-	-
3	Дарья / Darya	0,026	-	-
4	Водопойное / Vodopoynoye	0,043	4,56	-
5	Беседное / Besednoye	0,107	7,45	-
6	Песочное / Pesochnoye	0,109	6,61	-
7	Кругло-Орлово / Kruglo-Orlovo	0,128	4,67	4,24
8	Б. Каменное / B. Kamennoye	0,242	8,68	-
9	Валдай / Valday	0,273	5,23	3,96
10	Банное / Bannoye	0,335	6,69	-
11	Щучье / Shchuchye	0,596	5,62	4,97
12	Б. Красное / B. Krasnoye	2,699	8,43	6,62

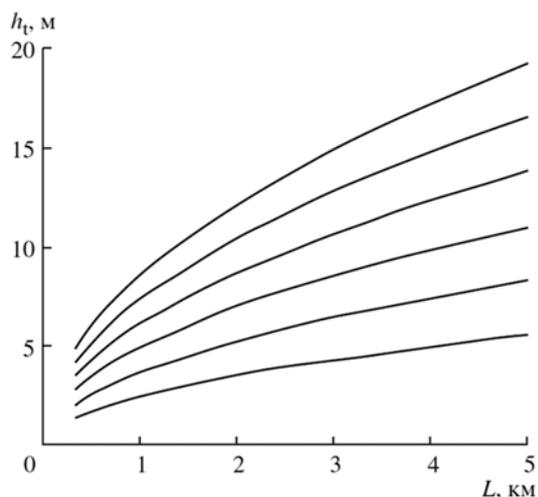


Рис. 6. Зависимость глубины термоклина от длины разгона и скорости ветра (кривые для $V = 4, 6, 8, 10, 12, 14$ м/с снизу вверх соответственно) [Пальшин и др., 2008]

Fig. 6. Dependence of the thermocline depth on the acceleration length and wind speed (curves for $V = 4, 6, 8, 10, 12, 14$ m/s from bottom to top, respectively) after [Palshin et al., 2008]

Коэффициент корреляции температуры и площади озер для глубин 9 м составил $R = 0,48$, для глубин 15 м — $R = 0,97$. Однако небольшое число исследованных озер о. Большой Соловецкий не позволяет говорить о данной корреляции с существенной долей достоверности. Также необходимо отметить тот факт, что даже для самого большого по площади озера Большое Красное глубина термоклина при максимальной скорости ветра должна составлять менее 15 м (рис. 6), в то время как температурная аномалия в этом озере наблюдается на глубине более 20 м.

Повышенные придонные температуры могут быть вызваны также теплообменом с донными осадками [Zdorovenkova et al., 2021].

Если же выявленные температурные аномалии не вызваны придонными химическими реакциями и ветровым перемешиванием, они свидетельствуют о наличии геотермической аномалии.

Заключение

Использование геотермальных ресурсов в РФ перспективно на удаленных территориях, где геотермальная энергетика может обеспечить локальную генерацию тепла и электричества. Однако применение геотермальных ресурсов на данных территориях сопровождается

рядом сложностей, в первую очередь — недостаточным количеством данных о геотермических характеристиках земной коры. В связи с тем, что бурение при решении исследовательских задач геотермии в таких областях экономически нецелесообразно, необходимо применение альтернативных методов оценки таких характеристик. Одним из перспективных методов идентификации локальных геотермических аномалий является метод измерения придонных температур водоемов. Экспериментальное применение метода на озерах острова Большой Соловецкий продемонстрировало наличие аномалий придонной температуры в некоторых глубоких озерах димиктического типа (озера Большое Красное и Щучье) и в то же время невозможность ясного определения природы термических аномалий без дополнительных исследований. То есть однозначного подтверждения геотермической аномалии получить не удалось, но наблюдаемые повышенные придонные температуры свидетельствуют о возможности ее существования.

Следующим шагом оценки геотермальной ситуации на Большом Соловецком острове должно быть проведение замеров температуры придонных слоев воды со льда. Такие измерения позволят исключить или подтвердить ветровую природу летних придонных температурных аномалий. В случае, если весенне-зимние наблюдения на тех же станциях покажут такие же повышенные значения, как и летние, для дальнейшего изучения и использования геотермальной аномалии станет необходимым бурение скважины глубиной до 500 м вблизи озера Большое Красное, где выявлены максимальные значения придонных температур. Если же весенне-зимние придонные температуры будут близки к «классическим» $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, вопрос о возможности использования геотермальных ресурсов на Большом Соловецком острове можно будет считать закрытым с отрицательным результатом.

Авторы благодарят компанию «Нефть-Сервис» и ее генерального директора Михаила Анатольевича Камышева за проявленный интерес к геотермальным исследованиям, а также за финансовую поддержку нового этапа геотермальных исследований на Соловецких островах. Авторы признательны всем сотрудникам ГГМ РАН, принявшим участие в экспедиции на Соловецкие острова, а также старшему научному сотруднику лаборатории гидрофизики Института водных проблем Севера КарНЦ РАН Н. И. Пальшину за консультации в ходе проведения исследований.

Литература

Богуславский Э. И. Освоение тепловой энергии недр [Электронный ресурс]. СПб.: Научное издание технологий, 2020. 435 с. URL: <https://publishing.intelgr.com/archive/osvoenie-teplovoy-energii-nedr.pdf> (дата обращения: 01.11.2021).

Гашо Е. Г., Каткова Е. Ю., Попов Д. Е. Разработка и проектирование гибридной системы энергоснабжения // Энергосбережение – теория и практика: Труды X Междунар. школы-семинара. Курск, 2020. С. 117–122.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Ред. Б. Х. Глуховской. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.

Гордиенко В. В., Загородняя О. В., Якоби Н. М. Тепловой поток континентов. Киев: Наукова думка, 1982. 184 с.

Кангаш А. И., Марьяндышев П. А. Комплексное исследование среднегодовой производительности парка ветроэнергетических установок на примере Соловецкого архипелага // Альтернативная энергетика и экология. 2019. № 22-27. С. 21–29. doi: 10.15518/isjaee.2019.22-27.021-029

Методические и экспериментальные основы геотермии / Отв. ред. П. Н. Кропоткин, Я. Б. Смирнов. М.: Наука, 1983. 218 с.

Никитин Д. С., Хуторской М. Д., Самсонова О. С., Тимонин С. А., Богданов И. О. Оценка термического потенциала подземной гидросферы Соловецкого архипелага (о. Большой Соловецкий) // Мониторинг. Наука и технологии. 2021. № 4. С. 15–25.

Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Потахин М. С. Влияние морфометрических характеристик и географической зональности на термическую стратификацию озер // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 2. С. 202.

Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / Под ред. Ю. Г. Шварцмана, И. Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.

Рянжин С. В. Глобальные статистические оценки геотермальных потоков в донных отложениях пресноводных озер // Докл. РАН. 1992. Т. 324, № 3. С. 562–566.

Черкасов С. В., Фархутдинов А. М., Фархутдинов И. М. Геоэкологические аспекты геотермальной энергетики // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2021. № 2. С. 17–26. doi: 10.31857/S0869780921020028

Шахвердов В. А., Шахвердова М. В. Исследования температурного режима придонной области оз. Байкал // Геология, геоэкология, эволюционная география / Под ред. Е. М. Нестерова, В. А. Снытко. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2018. С. 87–90.

Шварцман Ю. Г. Тепловое состояние литосферы и новейшие изменения климата на Европейском Севере // Литосфера и гидросфера Европейского Севера России. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С. 130–154.

Москалева В. Н., Марковский Б. А., Колбанцев Л. Р., Орлова М. П., Смолькин В. Ф. Магматизм и металло-

генения рифтогенных систем восточной части Балтийского щита / Под ред. А. Д. Щеглова. СПб.: Недра, 1993. 244 с.

Cherkasov S. V., Churikova T. G., Bekmurzaeva L. R., Gordeichik B. N., Farkhutdinov A. M. The state and prospects for the utilization of geothermal resources in the Russian Federation // Ecology, Environment and Conservation. 2015. Vol. 21, Suppl. iss. P. 67–77.

Cherkasov S., Farkhutdinov I., Nikitin D. Thermograms of lakes of Bolshoy Solovetsky Island. 2021. Mendeley Data. doi: 10.17632/rb6b2j6b5g.1

Renewable energy in Europe, 2018. Recent growth and knock-on effects. European Environmental Agency.

Zdrovennova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdrovennov R., Terzhevik A. Dissolved oxygen in a shallow ice-covered lake in winter: Effect of changes in light, thermal and ice regimes // Water. 2021. Vol. 13(17). Art. 2435. doi: 10.3390/w13172435

References

Boguslavsky E. I. Development of thermal energy of the subsurface. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2020. 435 p. URL: <https://publishing.intelgr.com/archive/osvoenie-teplovoy-energii-nedr.pdf> (accessed: 01.11.2021). (In Russ.)

Cherkasov S., Farkhutdinov I., Nikitin D. Thermograms of lakes of Bolshoy Solovetsky Island. 2021. Mendeley Data. doi: 10.17632/rb6b2j6b5g.1

Cherkasov S. V., Farkhutdinov A. M., Farkhutdinov I. M. Geoecological aspects of geothermal energy. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2021;2:17–26. (In Russ.)

Cherkasov S. V., Churikova T. G., Bekmurzaeva L. R., Gordeichik B. N., Farkhutdinov A. M. The state and prospects for the utilization of geothermal resources in the Russian Federation. *Ecology, Environment and Conservation*. 2015;21:67–77.

Gasho E. G., Katkova E. Yu., Popov D. E. Development and design of a hybrid power supply system. *Energoberezhnie – teoriya i praktika: Trudy X Mezhdunar. shkoly-seminara = Energy saving – theory and practice: Proceed. X int. school – seminar*. Kursk; 2020. P. 117–122. (In Russ.)

Glukhovskoi B. Kh. (ed.). Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. 2. The White Sea. Iss. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 240 p. (In Russ.)

Gordienko V. V., Zagorodnaya O. V., Yakobi N. M. Heat flow of continents. Kiev: Naukova dumka; 1982. 184 p. (In Russ.)

Kangash A. I., Maryandyshv P. A. A comprehensive study of the average annual productivity of the wind power plant park on the example of the Solovetsky Archipelago. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2019;22-27:21–29. doi: 10.15518/isjaee.2019.22-27.021-029 (In Russ.)

Kropotkin P. N., Smirnov Ya. B. (eds.). Methodological and experimental foundations of geothermy. Moscow: Nauka; 1983. 218 p. (In Russ.)

Moskaleva V. N., Markovskii B. A., Kolbantsev L. R., Orlova M. P., Smol'kin V. F. Magmatism and metallogeny of rift systems of the eastern part of the Baltic Shield. St. Petersburg: Nedra; 1993. 244 p. (In Russ.)

Nikitin D. S., Khutorskoi M. D., Samsonova O. S., Timonin S. A., Bogdanov I. O. Assessment of the thermal potential of the underground hydrosphere of the Solovetsky Archipelago (Bolshoy Solovetsky Island). *Monitoring. Science and Technologies*. 2021;4:15–25. (In Russ.)

Pal'shin N. I., Efremova T. V., Potakhin M. S. Impact of morphometric characteristics and geographical zonality on thermal stratification of lakes. *Water Resources*. 2008;35(2):202. (In Russ.)

Renewable energy in Europe, 2018. Recent growth and knock-on effects. European Environmental Agency.

Ryanzhin S. V. Global statistical assessment of geothermal flows in bottom sediments of freshwater lakes. *Proceedings of the Academy of Sciences*. 1992;324(3):562–566. (In Russ.)

Shakhverdov V. A., Shakhverdova M. V. Studies of the temperature regime of the near-bottom area of Lake Baikal. *Geologiya, geoekologiya, evolyutsionnaya geografiya = Geology, geoecology, and evolutionary geography*. St. Petersburg: RGPU im. A. I. Gertsena; 2018. P. 87–90. (In Russ.)

Shvartsman Yu. G., Bolotov I. N. (eds.). The natural environment of the Solovetsky Archipelago in a changing climate. Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS; 2007. 184 p. (In Russ.)

Shvartsman Yu. G. Thermal state of the lithosphere and the latest climate changes in the European North. *Lithosphere and hydrosphere of the European North of Russia*. Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS; 2001:130–154. (In Russ.)

Zdorovenova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdorovenov R., Terzhevik A. Dissolved oxygen in a shallow ice-covered lake in winter: Effect of changes in light, thermal and ice regimes. *Water*. 2021;13(17):2435. doi: 10.3390/w13172435

Поступила в редакцию / received: 15.11.2021; принята к публикации / accepted: 23.05.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Черкасов Сергей Владимирович

канд. геол.-мин. наук, д-р техн. наук, директор

e-mail: s.cherkasov@sgm.ru

Фархутдинов Исхак Мансурович

канд. геол.-мин. наук, доцент, заместитель директора по науке

e-mail: i.farkhutdinov@sgm.ru

CONTRIBUTORS:

Cherkasov, Sergey

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Dr. Sci. (Tech.), Director

Farkhutdinov, Iskhak

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor,
Deputy Director for Science